

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6**Мухаметгалина А.А.^{1,2}, Самигуллина А.А.², Мурзинова М.А.², Назаров А.А.²**¹*Башкирский государственный университет, Уфа, Россия*²*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия*a.mukhametgalina@mail.ru**Введение**

Известно, что ультрамелкозернистые материалы (УМЗ), полученные методами интенсивной пластической деформации (ИПД), обладают высокой прочностью при комнатной температуре, и проявляют признаки сверхпластичности (СП) при пониженных температурах и/или повышенных скоростях деформации [1]. Однако низкотемпературная сверхпластическая деформация требует высоких напряжений течения [2, 3].

В работе [4] изучалась СП деформация алюминиево-литиевого сплава 1420 при одновременном воздействии растягивающей нагрузки и осевых ультразвуковых колебаний. Показано, что воздействие ультразвука приводит к снижению напряжения течения и увеличению удлинений при СП. Этот эффект может объясняться тем, что ультразвук воздействует на дефектную структуру УМЗ материалов и приводит к снижению внутренних напряжений, релаксации неравновесных границ зерен, увеличению доли высокоугловых границ [5-8].

В данной работе проводится исследование влияния предварительной ультразвуковой обработки (УЗО) на характеристики сверхпластичности титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой, полученной равноканальным угловым прессованием (РКУП).

Материал и методики исследований

В качестве материала исследований использовали титановый сплав ВТ6, который был подвергнут термической обработке в двухфазной ($\alpha+\beta$) области, РКУП в оснастке с углом между каналами 120° по маршруту Вс, 6 циклов при $T=600^\circ\text{C}$ ($\epsilon_{\text{сум.}} \approx 4$).

Из полученных прутков вырезались образцы длиной 40 мм, которые были подвергнуты УЗО с амплитудой осциллирующих напряжений сжатия-растяжения 100 МПа.

Испытания на растяжение проводили на плоских образцах с размерами рабочей части: $l_0=10$ мм, $a_0=3,4$ мм, $b_0=1,5$ мм, при температуре $T=600^\circ\text{C}$ с начальными скоростями деформации 10^{-4} – 10^{-3} с⁻¹ на испытательной машине Instron 5982. Время выдержки образцов в печи до начала испытаний составляло 1 час. По результатам испытаний определяли величину относительного удлинения до разрыва δ , истинное напряжение σ и истинную деформацию ϵ на стадии равномерного удлинения, коэффициент чувствительности напряжения к скорости деформации m при $\epsilon=0,05$.

Микроструктуру исследовали в продольном сечении прутка методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMN FEG. Количественный анализ микроструктуры выполнялся в соответствии с рекомендациями [9]. Относительная погрешность определения средних величин структурных составляющих не превышала 10% при доверительной вероятности 90 %.

Результаты и обсуждение

Микроструктура сплава ВТ6 как до, так и после УЗО состоит из первичных α -зерен, которые занимают 25% объема, и смеси субмикронных кристаллов вторичной α -фазы и β -частиц; доля β -фазы составляет 9 %. Продольный и поперечный размеры зерен первичной α -фазы ($l_{\alpha 1}=15$ мкм, и $b_{\alpha 1}=6$ мкм) и β -частиц ($l_{\beta}=0,5$ мкм, и $b_{\beta}=0,2$ мкм) одинаковы до и после УЗО в пределах погрешностей измерений. Несмотря на идентичность исходной микроструктуры, характеристики СП сплава, обработанного ультразвуком, выше по сравнению с исходным УМЗ сплавом.

В таблице 1 приведены результаты испытаний в условиях СП сплава ВТ6, подвергнутого РКУП и РКУП+УЗО. Все образцы демонстрируют значительные удлинения до разрыва. Однако, в большинстве случаев равномерное удлинение образцов существенно меньше, чем общее (табл.1).

Таблица 1 - Относительное удлинение до разрыва /равномерное удлинение и коэффициент скоростной чувствительности образцов сплава ВТ6, подвергнутого РКУП и РКУП+УЗО

$\dot{\epsilon}_0, \text{c}^{-1}$	$\delta, \% / \epsilon_{\text{равномерное}}, \%$		m	
	РКУП	РКУП+УЗО	РКУП	РКУП+УЗО
$1 \cdot 10^{-3}$	136/83	172/118		
$6,7 \cdot 10^{-4}$	162/89	343/178	0,20	0,27
$3,3 \cdot 10^{-4}$	188/94	296/139	0,22	0,30
$1,7 \cdot 10^{-4}$	429/234	500/362 (не разрушился)	0,23	0,36
$1 \cdot 10^{-4}$	358/297	–	0.36	–

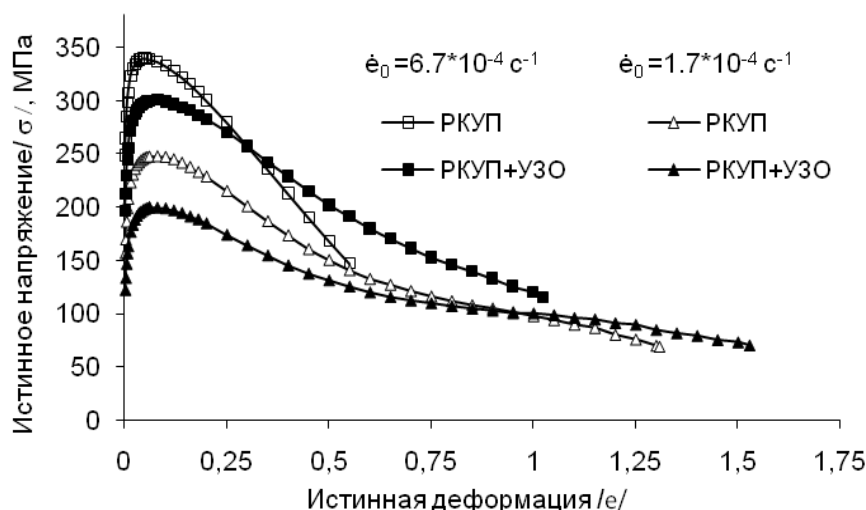


Рисунок 1- Типичные зависимости σ - e , полученные после испытаний образцов сплава ВТ6, подвергнутого РКУП и РКУП+УЗО с разной начальной скоростью деформации

Вид кривых σ - e не типичен для «классического» СП течения материала (рис.1). В большинстве случаев за стадией разупрочнения следует стадия локализации деформации. Установившаяся стадия течения наблюдалась при испытаниях с начальными скоростями $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ и менее. Присутствие на кривых σ - e стадии разупрочнения свидетельствует о протекании релаксационных процессов во время растяжения образцов. Наиболее вероятно, что при деформации развивалась динамическая рекристаллизация в зернах первичной α -фазы. Необходимо отметить, что УЗО приводит к снижению интенсивности развития разупрочняющих процессов во время деформации (рис.1).

После УЗО сплав ВТ6 во всех случаях демонстрировал меньшие значения напряжений течения на начальных стадиях деформации (рис.1) и большую чувствительность к скорости деформации (табл.1).

Можно предположить, что наблюдаемый эффект УЗО на характеристики СП деформации УМЗ сплава ВТ6 связан с изменениями дефектной структуры сплава, поскольку УЗО может ускорять развитие релаксационных процессов в УМЗ материалах

[5-8], что приводит как к уменьшению напряжения течения, так и к увеличению относительного удлинения до разрыва.

Заключение

Испытания на растяжение УМЗ сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной СП показали, что предварительная УЗО с амплитудой осциллирующих напряжений сжатия-растяжения 100 МПа приводит к увеличению чувствительности сплава к скорости деформации, его удлинения, и уменьшению напряжения течения. Для объяснения наблюдаемого эффекта необходимы дополнительные исследования влияния ультразвука на дефектную структуру материала.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН и поддержана РФФИ (грант № 16-19-10126).

Микроструктурные исследования и механические испытания проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН "Структурные и физико-механические исследования материалов".

Литература

- [1] R.Z. Valiev, A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. Hoboken, Wiley, 2013.
- [2] Y.G. Ko, J.H. Kim, C.S. Lee, S.Y. Han, D.H. Shin, S.L. Semiatin, High temperature deformation behavior of ultra-fine grained Ti-6Al-4V alloy, in: Y.T. Zhu, T.G. Langdon, R.Z. Valiev, S.L. Semiatin, D.H. Shin, T.C. Lowe (Eds.), Ultrafine Grained Materials III, TMS, Warrendale, 2004, pp. 659-664.
- [3] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.P. Semenova, Superplasticity in nanostructured materials: new challenges, Mater. Sci. Eng. A 463 (2007) 2–7.
- [4] М. М. Мышляев, В. В. Шпейзман, В. В. Клубович и др., ФТТ, 57 (10), 1986 (2015)
- [5] Мухаметгалина А.А., Самигуллина А.А., Сергеев С.Н., Жилиев А.П., Назаров А.А., Загидуллина Ю.Р., Пархимович Н.Ю., Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 2. С. 85-90.
- [6] A.A. Nazarov, Molecular dynamics simulation of the relaxation of a grain boundary disclination dipole under ultrasonic stresses, Letters on materials 6 (2016) 179-182.
- [7] Д.В. Бачурин, Р.Т. Мурзаев, Ю.А. Баимова, А.А. Самигуллина, К.А. Крылова. Письма о материалах 2016. Т.6. №3. С.183-188.
- [8] A.A. Samigullina, A.A. Nazarov, R.R. Mulyukov, Yu.V. Tsarenko, V.V. Rubanik, Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing, Rev. Adv. Mater. Sci. 39 (2014) 48-53.
- [9] Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. -376 с.